

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA HYDROMECHANIKY A HYDRAULICKÝCH
ZAŘÍZENÍ

**Výpočet hydraulického okruhu s uvažováním místních a třecích
ztrát užitím programu SiteFlow**

**Solution of Hydraulic Circuit Marketing account of Local and
Friction Losses using SiteFlow programme**

Student:

Jakub Mrovec

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Milada Kozubková, Csc.

Ostrava 2009

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Výpočet hydraulického okruhu s uvažováním místních a třecích ztrát
užitím programu SiteFlow.**

**Solution of Hydraulic Circuit Marketing account of Local and Friction
Losses using SiteFlow programme.**

Student: Jakub Mrovec

Studijní obor: B2341 Strojírenství

Specializace: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Pracoviště: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení – 338

Zásady pro zpracování:

1. Zpracování teorie hydraulických obvodů a jejich řešení v ustáleném proudění.
2. Měření hydraulických veličin v obvodu sestávajícího z potrubí a hydraulických prvků v ustáleném stavu.
3. Kontrola naměřených hydraulických veličin pro jednotlivé prvky výpočtem.
4. Zpracování možností přístupů k numerickému řešení hydraulických obvodů užitím programu SiteFlow a zhodnocení jeho schopností.
5. Výpočet základních hydraulických parametrů obvodu daného fyzikálním experimentem.
6. Porovnání numerických experimentálních výsledků a zhodnocení programu SiteFlow.

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

Anotace bakalářské práce

MROVEC, J. Výpočet hydraulického okruhu s uvažováním místních a třecích ztrát užitím programu SiteFlow. Ostrava: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB – TU Ostrava, 2009, 44 s. Bakalářská práce, vedoucí Kozubková, M.

Bakalářská práce se zabývá výpočtem daných hydraulických okruhu, s uvažováním místních a třecích ztrát. V úvodu je podrobně popsána teorie hydraulických obvodů a jejich řešení v ustáleném proudění.

Poté jsem v praxi naměřil základní veličiny v obvodu, sestávajícího z potrubí a hydraulických prvků, v ustáleném stavu a z těchto základních veličin se přes předepsané vzorce dopočetl až ke konečné veličině λ – součiniteli tření. Jestliže se od sebe teoretický a vypočtený součinitel λ výrazně neliší, tak se potvrdila správnost výpočtu okruhu. Kromě výpočtu podle složitých vzorců se dá správnost výpočtu posoudit také pomocí numerického řešení v programu SiteFlow. Po zadání několika vstupních parametrů si program lehce vypočte hydraulické parametry obvodu (například rychlost nebo tlak). Jestliže se tyto hodnoty shodují nebo mají velmi malou odchylku s hodnotami teoreticky vypočtenými, tak je potvrzena správnost výpočtu hydraulického okruhu. Tento postup platí pro určení třecích ztrát na vodní trati.

Pro zjištění místních ztrát na dané vodní trati se z naměřených hodnot (pomocí U-trubice) vypočtou ztrátové součinitele ξ , ale pro každý prvek zvlášť.

Annotation der Bakkalaureatsarbeit

MROVEC, J. Berechnung des hydraulischen Kreises mit dem Bedenken der örtlichen und reibungs Verluste, mit der nutzung des Programs SiteFlow. Ostrava: Lehrstuhl der Hydromechanik und der hydraulischen Anlagen, Fakultät für Maschinenbau. VŠB-TU Ostrava, 2009, 44s. Bakkalaureusarbeit, Leiter Kozubková, M.

Die Bakkalaureusarbeit befasst sich mit der Berechnung der gegebenen hydraulischen Kresien mit dem Bedenken der örtlichen und reibungs Verluste. In der Autakt ist ausführlich die Theorii der hydraulischen Kreise und ihrer Lösung in der Laminarströmung beschrieben.

Danach habe ich in der Praxis die Grundmessgröße im Kreis, der aus Rohrleitungen und hydraulischen Elementen besteht, beim stationären Zustand gemessen und aus diesen Grundmessgrößen habe ich mich über die Grundformel bis zu der Endmessgröße - dem Reibungskoeffizient errechnet. Wenn sich der theoretische von dem errechneten Koeffizient nicht wesentlich unterscheidet, dann hat sich die Richtigkeit der Berechnung bestätigt. Auser der Berechnung laut komplizierten Formeln, kann man die Richtigkeit der Berechnung auch mittels einer Lösung im numerischen Software SiteFlow beurteilen. Nach dem eingeben einige Eingangsparameter, berechnet leicht die Software die hydraulische Parameter im Kreis (z.B. die Geschwindigkeit oder den Druck). Wenn diese Werte übereinstimmen oder haben nur eine kleine Abweichung mit den Werten theoretisch berechneten, dann ist die Richtigkeit der Berechnung des hydraulischen Kreises bestätigt. Dieses Verfahren gilt für die Bestimmung der Reibungsverluste an einer Wasserstrecke.

Obsah bakalářské práce

Přehled použitých označení a jejich jednotek.....	8
1. POTRUBNÍ SÍTĚ.....	11
1.1 <i>Výpočet potrubních sítí.....</i>	12
1.1.1 <i>Tlaková čára.....</i>	12
1.1.2 <i>Řešení jednoduchého potrubí.....</i>	12
1.1.3 <i>Výpočet rozvětvené nebo okruhované sítě.....</i>	13
2. HYDRAULICKÝ VÝPOČET POTRUBÍ.....	16
2.1 <i>Třecí ztráty v potrubí.....</i>	16
2.2 <i>Místní odpory (ztráty).....</i>	19
3. KONTROLA NAMĚŘENÝCH HYDRAULICKÝCH VELIČIN VÝPOČTEM.....	20
3.1 <i>Měření třecích ztrát na vodní trati.....</i>	20
3.2 <i>Měření místních ztrát na vodní trati.....</i>	25
4. PROGRAM SiteFlow2005.....	30
5. VÝPOČET FYZIKÁLNÍM EXPERIMENTEM.....	31
5.1 <i>Příklad proudění v jednoduchém obvodu</i>	31
5.2 <i>Příklad proudění ve složeném obvodu.....</i>	33
6. ZÁVĚR.....	35
7. POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA.....	37
8. PŘÍLOHY.....	39
8.1 <i>Tabulky.....</i>	39
8.2 <i>Grafy.....</i>	41
<i>Ukázka vizuální podoby programu SiteFlow.....</i>	44
<i>Speciální příloha – CD</i>	

Přehled použitých označení a jejich jednotek

a	<i>přídavné značení pro zjednodušení vzorců</i>	$[-]$
b	<i>přídavné značení pro zjednodušení vzorců</i>	$[-]$
c	<i>absolutní rychlost</i>	$[m.s^{-1}]$
d	<i>průměr</i>	$[mm]$
e_z	<i>měrná ztrátová energie</i>	$[J.kg^{-1}]$
g	<i>tíhové zrychlení</i>	$[m.s^{-2}]$
h	<i>výška</i>	$[cm]$
h_1	<i>první výška hladiny U-trubice</i>	$[cm]$
h_2	<i>druhá výška hladiny U-trubice</i>	$[cm]$
h_z	<i>ztrátová výška</i>	$[cm]$
Δh_c	<i>ztrátová výška na cloně</i>	$[cm]$
Δh_p	<i>ztrátová výška na potrubí</i>	$[cm]$
j	<i>počet větví v obvodu</i>	$[-]$
k	<i>absolutní drsnost stěny potrubí</i>	$[mm]$
k	<i>počet uzlů</i>	$[-]$
k_Q	<i>konstanta</i>	$[-]$
l	<i>délka</i>	$[mm]$
p	<i>tlak</i>	$[Pa]$
p_1	<i>tlak v průřezu 1</i>	$[Pa]$
p_2	<i>tlak v průřezu 2</i>	$[Pa]$
Δp	<i>tlakový spád</i>	$[Pa]$

Δp_p	<i>tlaková ztráta</i>	$[Pa]$
Δp_i	<i>tlaková ztráta pro jednotlivé větve</i>	$[Pa]$
q_1	<i>vstupní průtok</i>	$[m^3.s^{-1}]$
q_3	<i>výstupní průtok</i>	$[m^3.s^{-1}]$
v	<i>rychlost</i>	$[m.s^{-1}]$
v_1	<i>relativní rychlost v průřezu 1</i>	$[m.s^{-1}]$
v_1	<i>relativní rychlost v průřezu 2</i>	$[m.s^{-1}]$
H	<i>tlaková výška</i>	$[cm]$
L	<i>délka potrubí</i>	$[m]$
P_1	<i>příkon</i>	$[kW]$
Re	<i>Reynoldsovo číslo</i>	$[-]$
Q_v	<i>objemový průtok</i>	$[m^3.s^{-1}]$
Q_i	<i>objemový průtok v jednotlivých větvích</i>	$[m^3.s^{-1}]$
Y	<i>měrná energie</i>	$[J.kg^{-1}]$
ξ	<i>ztrátový součinitel</i>	$[-]$
ξ_m	<i>místní ztrátový součinitel</i>	$[-]$
ξ_c	<i>celkový ztrátový součinitel</i>	$[-]$
ε	<i>relativní drsnost stěny</i>	$[-]$
η	<i>celková účinnost</i>	$[\%]$
η	<i>dynamická viskozita</i>	$[Pa.s]$
λ	<i>součinitel tření</i>	$[-]$
ν	<i>kinematická viskozita</i>	$[m^2.s^{-1}]$
ρ	<i>hustota</i>	$[m^3.kg^{-1}]$

1. POTRUBNÍ SÍŤ

Potrubní síť je soustava potrubí, které se rozprostírá v určité oblasti a umožňuje odebírat tlakovou kapalinu na různých místech. Sestává z jednotlivých úseků – větví, spojených do uzlů. V uzlech či na větvích jsou umístěny různé odběry. Na potrubní síť jsou kladeny nároky zajistit požadované množství tlakové kapaliny i za předpokladů, že některé z větví jsou mimo provoz (porucha, oprava apod.).

K odstavení jednotlivých větví jsou tyto vybaveny potřebnou armaturou. Potrubní síť musí být dimenzována tak, aby vyhovovala pevnostně, jak při ustáleném provozu, tak i při nestacionárních stavech, kdy dochází k rázům v potrubí.

Z provozního hlediska musí být vybavena dále zařízením umožňujícím krýt náhlý zvětšený odběr, tj. vodojemem nebo nádrží. V neposlední míře jsou důležité znalosti stavu kapaliny, tj. průtoky a tlaky v jednotlivých místech sítě a jejich měření. [1]

1.1 Výpočet potrubních sítí

Vlastní hydraulický výpočet sítě je velmi složitým a rozsáhlým problémem, v současné době se realizuje pro rozměrné sítě především s využitím výpočetní techniky a to jak pro tacionární, tak i pro nestacionární stav (časově závislý zdroj kapaliny, nerovnoměrný odběr apod.). Úkolem výpočtu je určení vhodných průměrů potrubí v jednotlivých větvích a výpočet tlaku, tzv. tlakové čáry v síti. Jsou-li průměry potrubí dány, omezí se výpočet na určení tlakové čáry s případným doporučením změny nevyhovujících průměrů potrubí.

Výchozí předpoklady pro **výpočet sítě** jsou:

- schéma sítě s udáním délek a výškových rozdílů, případně průměrů potrubí
- spotřeba v místě odběru
- požadované přetlaky v místě odběru
- údaje o zdrojích (výkonnost a přetlak apod.)
- údaje o časovém vymezení provozu jednotlivých částí sítě
- ekonomické údaje (ceny potrubí, hodnoty odpisů, životnosti, cena el. energie)

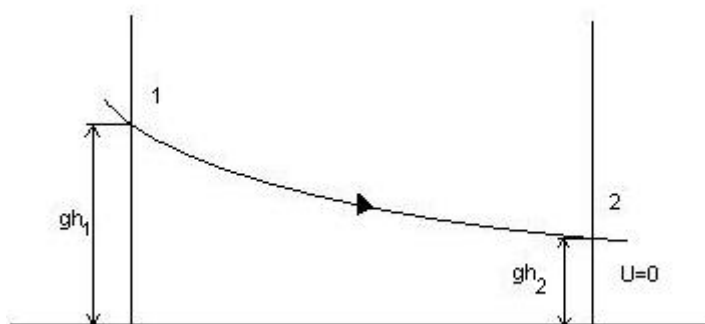
Potrubní systém je buď **jednoduchý**, tvořený jedním potrubím nebo složený, sestávající z většího počtu potrubí tvořících obvod obsahující uzly a větve (viz. Teorie elektrických obvodů). Ve složeném potrubním systému je možno identifikovat části rozvětveného a okružního systému v kombinaci. Řešení takového systému je matematicky složitější, využívá se maticového přístupu k popisu systému a počítačů při numerickém zpracování. [1]

1.1.1 Tlaková čára

Při návrhu potrubí je nutné vzhledem ke spolehlivé činnosti potrubí podržet důležitou podmínku a sice, že osa potrubí vždy leží pod čarou tlaku. Pro definování čáry tlaku se předpokládá vodorovné potrubí s nádrží.

1.1.2 Řešení jednoduchého potrubí

Pro jednoduché potrubí stálého průřezu, platí Bernoulliho rovnice, která porovnává energii kapaliny např. na počátku (1) a konci (2) potrubního úseku.



Obr. 1.1 Schéma jednoho potrubního úseku

Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{\rho} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{\rho} + gh_2 + gh_z \quad (1.1)$$

Pokud se předpokládá že $v_1 = v_2$ (potrubí konstantního průřezu), rovnice se zjednoduší na:

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + gh_z \quad (1.2)$$

Protože je zvykem vyjadřovat charakteristiku potrubí jako závislost tlakového spádu Δp na průtoku Q , pak:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g(h_2 - h_1) + \rho \frac{\xi_c}{2} \left(\frac{4}{\pi d^2} \right)^2 Q^2 = \rho g h + k_Q Q^2 = \rho g h + k_Q Q|Q|$$

(1.3) Tlaková ztráta je úměrná druhé mocnině průtoku Q^2 . Pokud by proudění neměnilo směr, pak bude jednoduše tlaková ztráta úměrná výrazu $Q|Q|$.

Je-li uvažována jen třecí ztráta v potrubí, je konstanta k_Q určena vztahem:

$$k_Q = \rho \lambda \frac{8l}{d^5 \pi^2} \quad (1.4)$$

Přepoččet mezi měrnou energií, tlakovou ztrátou a tlakovou výškou je následující:

$$Y = \frac{\Delta p}{\rho} = gH \quad (1.5)$$

kde Y je měrná energie, $\Delta p = p_1 - p_2$ je tlakový spád a tlaková výška H udává rozdíl tlakových výšek na počátku a na konci potrubí, který je potřebný pro průtok Q . [1]

1.1.3 Výpočet rozvětvené nebo okruhané sítě

Pro rozvětvenou nebo okružní síť při izotermickém proudění pro každou její větev musí platit Bernoulliho rovnice. Tak obecně pro větev mezi uzly i a $i + 1$ lze napsat:

$$\Delta p_i = \rho g(h_{i+1} - h_i) + k_{Q_i} Q_i^2 \quad (1.6)$$

Pro každý uzel sítě musí platit rovnice kontinuity (**uzlová podmínka**) $\sum Q_i = 0$ Což je analogie Kirchhofova zákona u el. obvodů, přitom průtoky mají znaménko podle toho, jestli kapalina do uzlů vtéká nebo vytéká. Pro okružní síť pro každý její okruh musí analogicky platit analogie druhého Kirchhofova zákona, tj. že součet měrných energií (resp. tlakových diferencí, resp. tlakových výšek) v jednotlivých větvích postupně sčítaných

v jednom smyslu je opět roven nule (**okruhová podmínka**) $\sum \Delta p_i = 0$ [3]

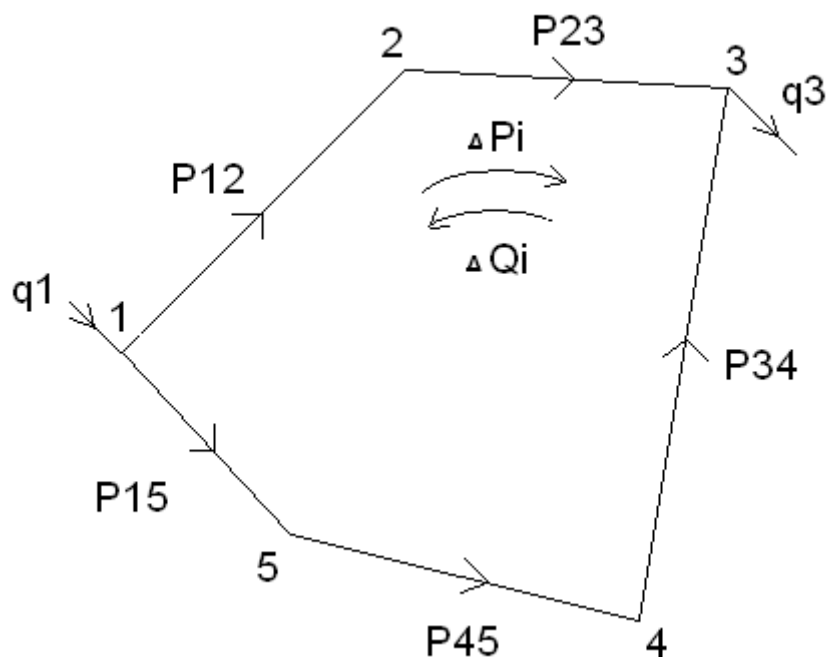
Celkový počet rovnic, který pro danou síť lze napsat je $n = j + k$

kde:

j počet větví

k ... počet uzlů.

Počet okruhů je $m = j - k + 1$.



obr. 1.1 Schéma okruhované sítě s jedním okruhem

Okruh je označený I, uzly jsou označeny číslicemi 1-5 (náhodně) a větve písmenem P (potrubí) a dvojicí čísel definovaných uzly, které jsou tímto potrubím spojeny, tj. P12, P23, P34, P45 a P15, přitom pořadí uzlů nesouvisí se směrem průtoku, ten je dán znaménkem. Pro hledané průtoky v uzlech platí uzlová podmínka:

$$1. \quad q_1 - Q_{12} - Q_{15} = 0 \quad (1.7)$$

$$2. \quad Q_{12} - Q_{23} = 0$$

$$3. \quad Q_{23} - Q_{34} - q_3 = 0$$

$$4. \quad Q_{45} - Q_{34} = 0$$

$$5. \quad Q_{15} - Q_{45} = 0$$

Pro tlakový spád v okruhu platí okružová podmínka:

$$\Delta p_1 = 0 = k_{Q_{12}} Q_{12}^2 + k_{Q_{23}} Q_{23}^2 - k_{Q_{34}} Q_{34}^2 - k_{Q_{45}} Q_{45}^2 - k_{Q_{15}} Q_{15}^2 \quad (1.8)$$

Rovnici lze zjednodušit tak, že všechny průtoky se vyjádří pomocí Q_{12} a zadaného vstupního a výstupního průtoku q_1 a q_3 :

$$Q_{15} = q_1 + Q_{12} \quad (1.9)$$

$$Q_{23} = Q_{12}$$

$$Q_{34} = q_3 - Q_{23} = q_3 - Q_{12}$$

$$Q_{45} = Q_{34} = q_3 - Q_{12}$$

Tyto vztahy se dosadí do okružové podmínky pro tlakový spád v okruhu, kvadratické dvojčleny se umocní a roznásobí, poté se získá kvadratická rovnice o jedné neznámé Q_{12} , kterou lze vyřešit analyticky:

$$aQ_{12}^2 + bQ_{12} + c = 0 \Rightarrow Q_{12} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1.10)$$

ostatní průtoky se určí zpětným dosazením. [1]

2. HYDRAULICKÝ VÝPOČET POTRUBÍ

Hydraulický výpočet potrubí je založen na aplikaci rovnice kontinuity, Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu na určení hydraulických odporů, neboli hydraulických ztrát. Při proudění skutečných tekutin vznikají následkem viskozity hydraulické odpory, tj. síly, které působí proti pohybu částic tekutiny. Mechanismus hydraulických odporů je složitý jev, který se dosud nepodařilo exaktně vyřešit, až na jednodušší případy laminárního proudění. Proto se v hydraulických výpočtech uplatňuje řada poloempirických metod. [1]

Pod pojmem hydraulické odpory při proudění skutečné tekutiny jsou zahrnuty všechny účinky, které způsobují rozptyl energie. Rozptýlená (ztrátová) energie na hydraulických odporech se projeví buď jako tlakový úbytek (vynucené proudění v potrubí apod.), nebo úbytek kinetické energie (výtok u nádob otvory apod.), anebo snížení polohové energie (proudění v korytech, gravitační potrubí apod.).

Hydraulické odpory se dělí na:

- **Třecí odpory**, které jsou charakteristické v místech, že závisí na délce potrubí, kanálu, apod.
- **Místní odpory**, které vznikají v místech, kde se mění velikost rychlosti (změna průřezu), směr rychlosti (zakřivené potrubí), popřípadě velikost i směr rychlosti (armatury) a dochází přitom k odtržení proudu a vzniku vířivé oblasti/

2.1 Třecí ztráty v potrubí

Ztrátový součinitel ζ třecího odporu je funkcí délky potrubí a průměru, tj. je přímo úměrný délce potrubí L a tzv. třecímu součiniteli λ . Velikost tlakové ztráty či ztrátové výšky se dá odvodit analyticky a měrná ztrátová energie je určena rovnicí (tzv. Darcy-Weisbachova rovnice):

$$e_z = \zeta \frac{v^2}{2} = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \quad (2.1)$$

Laminární proudění. U laminárního proudění pro $Re < 2320$ je třecí součinitel definován jako:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \text{ kde } Re = \frac{v \cdot d}{\nu}; \quad \eta = \rho \cdot \nu \quad (2.2)$$

Turbulentní proudění. U turbulentního proudění je tečné napětí větší a proto jsou ztráty třením větší než u laminárního proudění. Součinitel tření (λ) je závislý na velikosti

$$\text{Reynoldsova čísla a relativní drsnosti } \varepsilon = \frac{k}{d} \quad (2.3)$$

$$\lambda = f(Re, \varepsilon) \quad (2.4)$$

$$\text{kde } Re = \frac{v \cdot d}{\nu} - \text{Reynoldsovo číslo} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon = \frac{k}{d} - \text{relativní drsnost stěny}$$

k [mm] – je absolutní drsnost stěny potrubí

Rovnice pro třecí součinitel se nedá řešit analyticky, proto musela být stanovena experimentálně. Pro hladké potrubí ($k=0$) v roce 1913 odvodil **Blasius** empirický vztah:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (2.6)$$

Nikuradse pro hladké potrubí udává podle výsledků pokusů vzorec:

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(Re \cdot \sqrt{\lambda} \right) - 0,8 \right]^2} \quad (2.7)$$

Součinitel tření v **Altšulově vzorci** při uvažování drsnosti potrubí je explicitně vyjádřený ve formě:

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{100}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0,25} \quad (2.8)$$

Pro tuto oblast bylo různými autory odvozeno několik desítek rovnic, nejčastěji se však používá vzorec, který odvodil **Colebrook – White**: [2]

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) + 0,27 \frac{k}{d} \right]^2} \quad (2.9)$$

Tato rovnice je implicitní a λ se musí řešit iterací. Proto byly v posledních letech mnoha autory odvozeny pro λ explicitní vzorce. Jako příklad je uvedena rovnice odvozená **Churchillem**: [1]

$$\lambda = 8 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(a+b)^{1,5}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (2.10)$$

$$a = \left[-2,457 \cdot \ln \left(\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \varepsilon \right) \right]^{16} \quad (2.11)$$

$$b = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (2.12)$$

Absolutní drsnost potrubí k závisí na druhu materiálu, zpracování a provozních podmínkách (koroze, eroze). Podle zkušeností různých autorů, jsou zde uvedeny drsnosti vybraných materiálů: [1]

Materiál potrubí	Původní stav [mm]	Korodovaný stav [mm]
Tažené trubky mosazné, měděné, hliníkové	0,0015 až 0,003	0,003 až 0,1
Bezešvé trubky ocelové	0,04 až 0,1	0,1 až 0,9
Tažené trubky ocelové	0,03 až 0,12	0,12 až 0,9
Svařované trubky ocelové	0,05 až 0,1	0,1 až 0,9
Vodovodní potrubí po 20-ti a více letech v provozu	-	0,6 až 3,0

Pozinkované trubky ocelové	0,15 až 0,5	0,5 až 3,5
Skleněné trubky, trubky z plastů	0,0015 až 0,01	-
Prýžkové hadice	0,01 až 0,03	-
Betonové potrubí	0,3 až 6,0	-

Tab. 2.1 Tabulka drsnosti vybraných materiálů

2.2 Místní odpory (ztráty)

V každém potrubí bývají vedle rovných úseků i různá kolena, odbočky, armatury, měřicí zařízení, čističe, chladiče apod., kromě toho se může měnit průřez potrubí. V těchto částech potrubí dochází ke změně velikosti i směru rychlosti proudění, což vyvolá víření, popřípadě odtržení proudu kapaliny spojené rozptylem energie. Energie proudící, kapaliny se rozptyluje

v místě potrubí, kde dochází ke změně velikosti vektoru rychlosti, proto je rozptyl nazván místními ztrátami. Velikost místních ztrát, tj. **ztrátová energie při místních ztrátách** se vyjadřuje obdobně, jako ztráta třením, rychlostní výškou a ztrátovým součinitelem:

$$e_z = \frac{P_z}{\rho} = g \cdot h_z = \xi_m \frac{v^2}{2} \quad (2.13)$$

Ztrátový součinitel ξ_m závisí na druhu místní ztráty, konstrukčních parametrech, drsnosti stěn, tvaru rychlostního profilu a na režimu proudění. Vliv Reynoldsova čísla se projevuje obdobně jako u třecích odporů především při malých hodnotách tohoto čísla. **Určuje se především empiricky.** Pro hodnoty Reynoldsova čísla $Re \geq 10^5$ jsou hodnoty ztrátového součinitele téměř konstantní. [1]

3. KONTROLA NAMĚŘENÝCH HYDRAULICKÝCH VELIČIN VÝPOČTEM

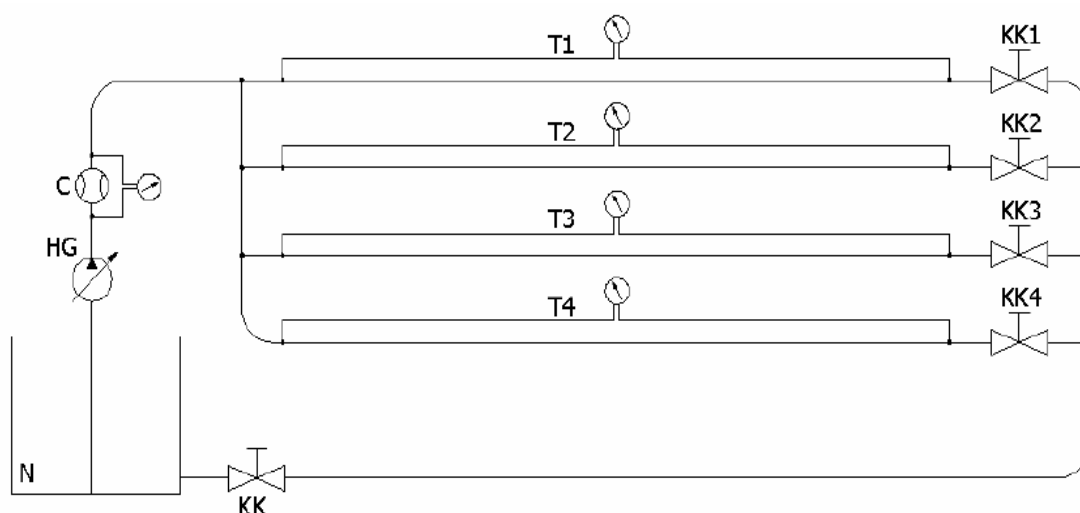
3.1 Měření třecích ztrát na vodní trati

Při měření ztrát na vodní trati, odečítáme tlakový úbytek na daném rovném úseku potrubí pomocí U trubice. Odběrná místa U trubice jsou na začátku a na konci měřeného úseku. Na rovných úsecích potrubních systémů závisí ztráty energie u laminárního proudění na rychlosti proudění, tj. na velikosti Reynoldsova čísla. V případě turbulentního proudění může ztráta energie záviset i na vnitřní drsnosti potrubí.

Popis měřicího zařízení

Zkušební měřicí obvod se skládá z několika typů potrubí, kterými se může rozvádět např. voda v rodinném domě. Do obvodu je zapojeno hladké potrubí o vnějším průměru 20 mm (T1), 25 mm (T2) a 32 mm (T4) a drsné potrubí o vnějším průměru 25 mm (T3). Všechny typy potrubí mají stejnou délku l . Dále je do obvodu zapojena nádrž na vodu (N), čerpadlo (HG), U trubice (UT1 – UT5 a UTC) pro měření rozdílu tlakové energie a spojovací prvky potrubí. Způsob zapojení je na obr. 3.1.

Obvod funguje tak, že čerpadlo nasává vodu z instalované nádrže a vhání ji do potrubního systému. Potrubní systém je tvořen potrubím T1, T2, T3 a T4. Postupně je na každém typu potrubí zjišťována tlaková diference z odběru tlaku pomocí U trubice. Postupně jsem měřil zvlášť první potrubí (T1), druhé potrubí (T2) a potrubí třetí (T3). Jako čtvrté měření byla tlaková ztráta na všech třech předcházejících potrubích otevřených najednou. Z potrubního systému je voda odváděna zpět do nádrže.



obr. 3.1 Schéma zkušebního obvodu

Specifikace použitých prvků

Nádrž (N)

Objem nádrže: 42 dm^3

Čerpadlo (HG)

Typ: cirkulační čerpadlo WILO RS 25/4 230 V PN 10

Jmenovité otáčky: $1200/1650/2000 \text{ ot.min}^{-1}$

Clona (C)

Vnitřní průměr clony: 14 mm

Vnitřní průměr potrubí: 18 mm

Potrubí (T4)

Vnější průměr: 32 mm

Vnitřní průměr: 23,2 mm

Délka: 1,104 m

Potrubí (T2,T3)

Vnější průměr: 25 mm

Vnitřní průměr: 18 mm

Délka: 1,104 m

Potrubí (T1)

Vnější průměr: 20 mm

Vnitřní průměr: 14,4 mm

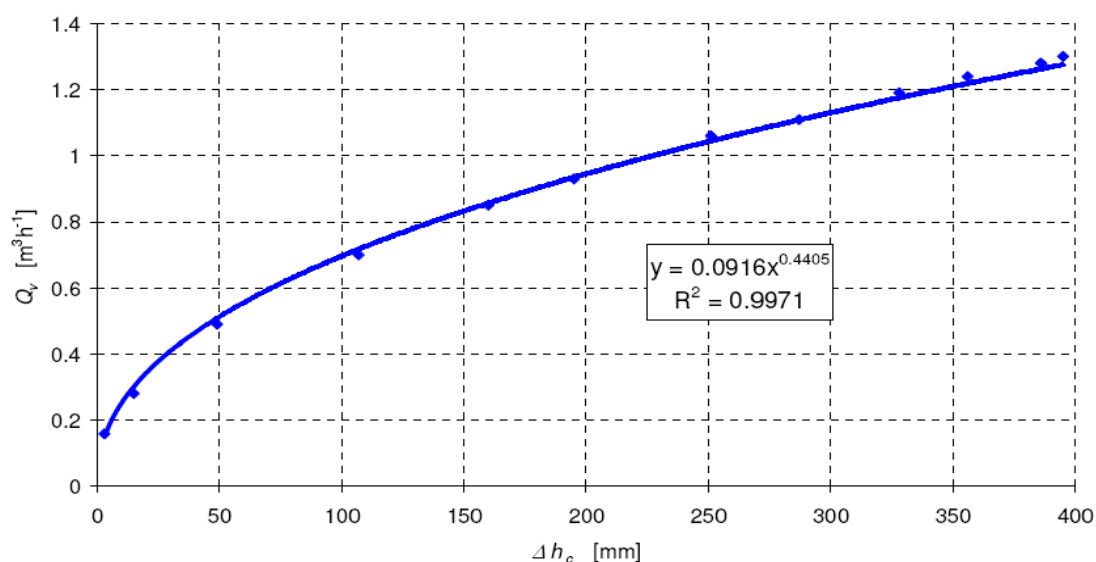
Délka: 1,104 m

Kulový kohout (KK)

Vnitřní průměr: 18 mm

Cejchovní křivka clony

Při použití clony jako měřidla průtoku je nutné znát tzv. cejchovní křivku clony (viz obr.3.2), pomocí které lze ze ztrátové výšky na cloně určit průtok, který je této ztrátové výšce úměrný.



obr. 3.2 Cejchovní křivka clony z obvodu na měření třecích ztrát

Postup měření

Je podrobně popsán v návodu pro laboratorní měření [8].

Vyhodnocení měření

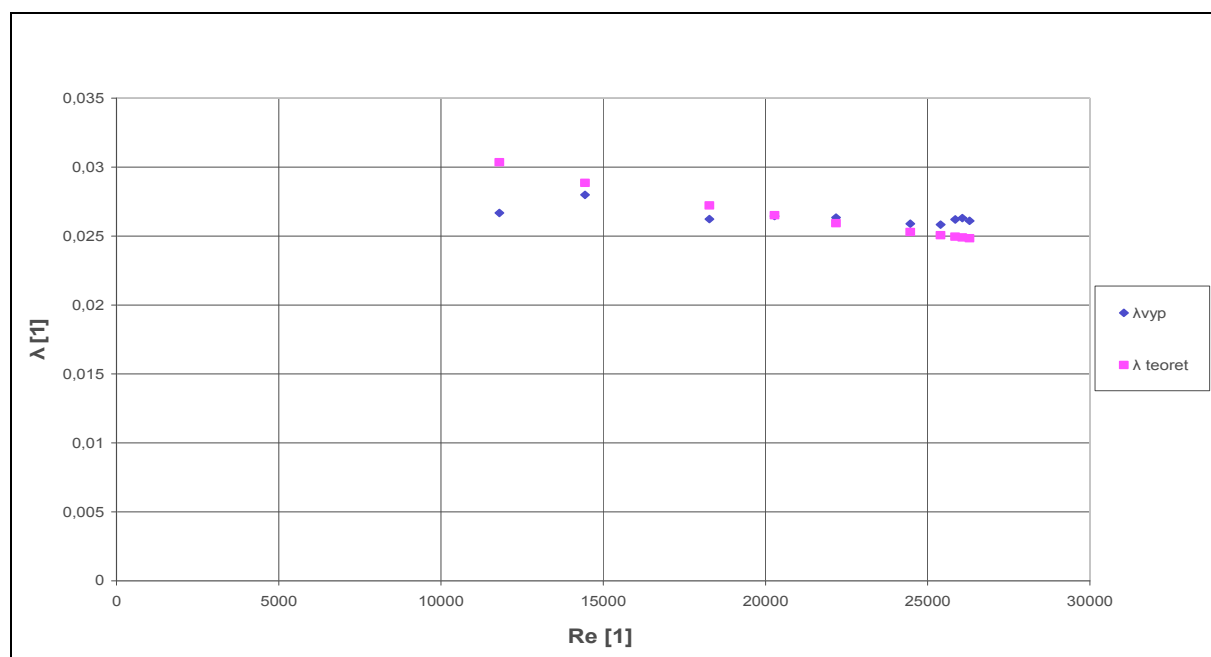
Pro výpočet třecích ztrát je nutné znát ztrátovou výšku Δh (tlakovou ztrátu Δp), rychlost proudění v v potrubí, délku l potrubí a vnitřní průměr d potrubí. Všechny pomocné neznámé vypočítáme a zapíšeme do tabulky (tab. 3.1).

Pro hladké potrubí (T1) jsem z tlakového spádu Δp_p vypočetl žádaný třecí součinitel λ vyp. Z **Blasiusova** empirického vztahu jsem určil λ teoretické. Obě hodnoty se lišily v řádu

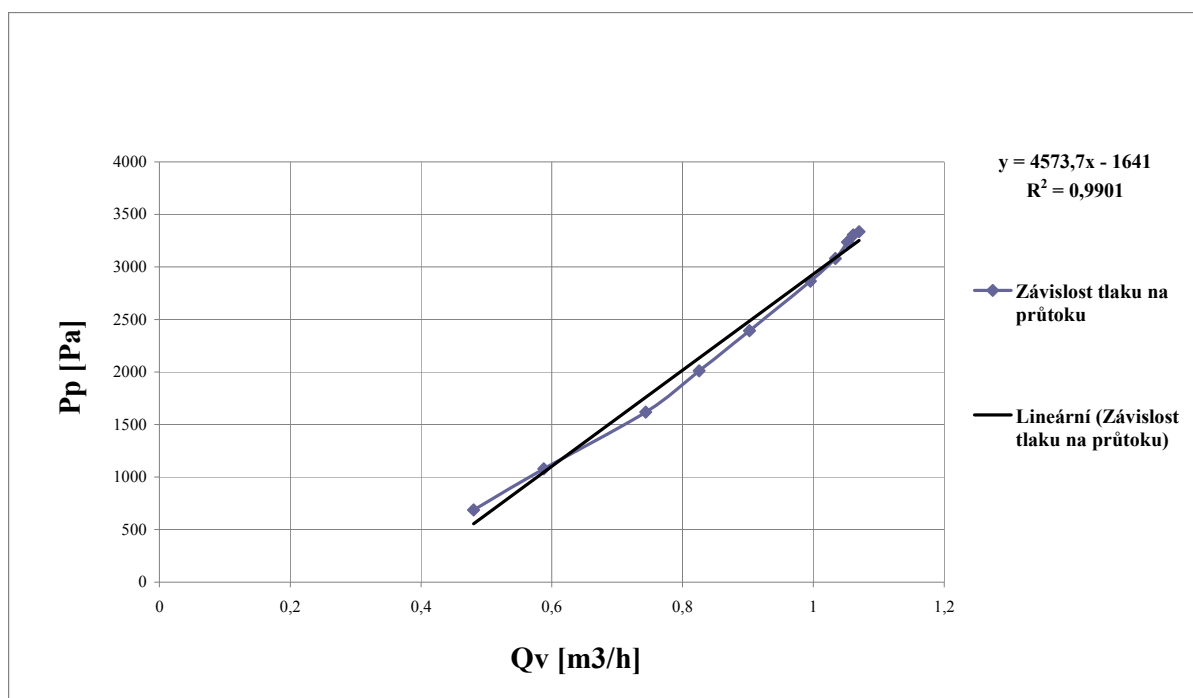
několika tisícín milimetrů, což je zanedbatelný rozdíl, takže se výpočtem potvrdila správnost měření, což dokazuje i přiložený graf (obr. 3.3). Dále jsem zde uvedl graf závislosti tlaku na průtoku (obr. 3.4).

Měření	Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty					
	Δh_c [cm]	Δh_p [cm]	Δp_p [Pa]	Q_v [$m^3 h^{-1}$]	v [m/s]	Re [-]	λ_{teoret} [-]	λ_{vypoct} [-]
1.	26,5	34	3335,4	1,070	1,826	26291	0,026	0,025
2.	26	33,7	3306,0	1,061	1,810	26071	0,026	0,025
3.	25,5	33	3237,3	1,052	1,795	25849	0,026	0,025
4.	24,5	31,4	3080,3	1,034	1,764	25397	0,026	0,025
5.	22,5	29,2	2864,5	0,995	1,699	24462	0,026	0,025
6.	18	24,4	2393,6	0,902	1,540	22172	0,026	0,026
7.	14,7	20,5	2011,1	0,825	1,408	20280	0,026	0,027
8.	11,6	16,5	1618,7	0,744	1,269	18271	0,026	0,027
9.	6,8	11	1079,1	0,588	1,003	14440	0,028	0,029
10.	4,3	7	686,7	0,480	0,819	11801	0,027	0,030

Tab. 3.1 Naměřené a vypočtené hodnoty pro 1. trubici



Obr. 3.3 Graf závislosti λ – Re pro první potrubí



Obr. 3.4 Graf závislosti Δp_p - Q_v pro 1. potrubí

Totéž jsem provedl i u druhého potrubí (T2), výsledný součinitel λ vyšel velmi podobně jako u předchozího měření, opět se lišil jen v několika tisících milimetrů (viz tab. 8.1, obr. 8.2 a obr. 8.3 v přílohách)

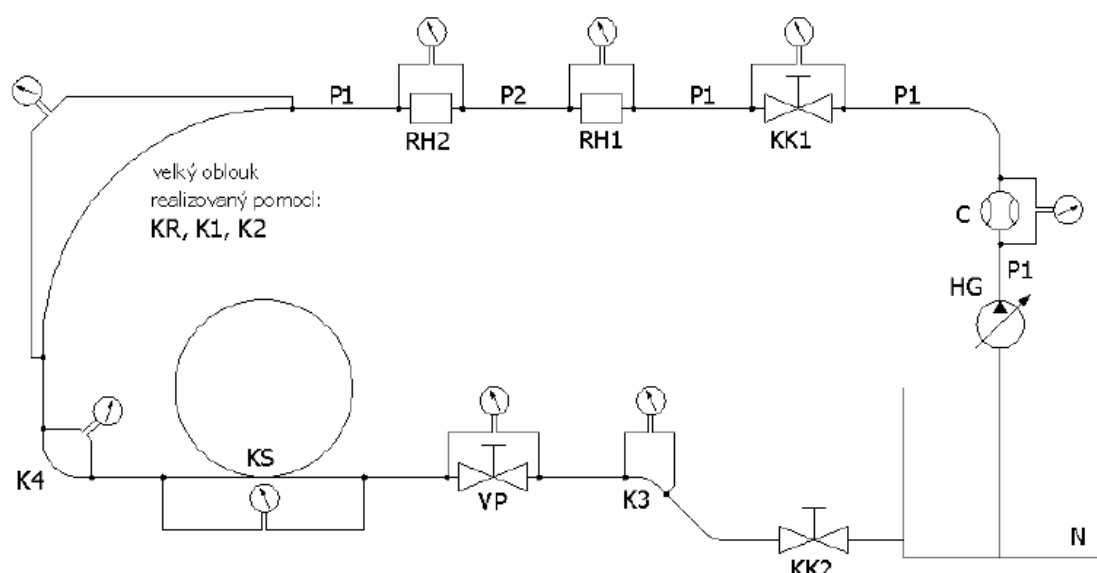
Třetí potrubí (T3) se od těch dvou předchozích lišilo nejen změnou průměru, ale také jsem už musel počítat s drsností $k = 0,007$, ve vnitřním průměru potrubí. Vypočtená λ vyšla o jeden řád více než u předchozích dvou potrubí, což je vzhledem k dané drsnosti v pořádku (tab. 8.2 a obr. 8.3) Pro kontrolu λ jsem ale použil hned několik vzorců. Výpočet podle **Altšula** (2.8) vyšel zcela odlišně od naměřené hodnoty a to o jeden řád. Výpočet podle **Nikuradseho** (2.7) se také neblížil naměřené hodnotě, protože tento vzorec nezávisí na drsnosti potrubí. Až výpočty podle **Colebrook-White** (2.9) a také **Churchilla** (2.10) vyšly téměř ideálně, což dokazuje i přiložený graf v příloze (obr. 8.4). Vzorce podle Nikuradseho a Colebrook-White jsou implicitní, proto se musely počítat iterací v excelu (k nahlédnutí na přiloženém CD).

Pro výpočet těchto tří potrubí otevřených současně λ nelze spočítat, protože máme pro každou větev jiný průtok a tím pádem i jinou rychlost ze které výsledné λ počítáme. Graf z toho měření je k nahlédnutí v příloze (obr. 8.5), tabulka s vypočtenými hodnotami není důležitá, ale je k nahlédnutí na přiloženém CD.

3.2 Měření místních ztrát na vodní trati

Zkoumání a vyhodnocování místních ztrát jednotlivých prvků potrubí je zásadní pro správný návrh jak samotného potrubního systému, tak čerpadla, které vhání do systému tekutinu určitou omezenou rychlostí a tlakem na který je dimenzováno. V extrémním případě by se mohlo stát, že odpory potrubního systému budou natolik veliké, že čerpadlo tekutinu přes potrubní systém „neprotlačí“.

Teoretické stanovení místní ztráty na prvku je obtížné a nepřesné, proto je nezbytné přesné stanovení odporu provést experimentálně. Pro experimentální stanovení velikosti ztráty některých prvků byl vytvořen zkušební obvod viz obr. 3.5.



obr. 3.5 Zkušební obvod

Popis měřicího zařízení

Zkušební měřicí obvod se skládá z prvků, které mohou tvořit například rozvod vody v rodinném domě. Je v něm použito několik prvků, na kterých dochází k místním ztrátám energie. Jmenovitě to jsou tyto prvky: clona (C), koleno 90° (K4), kulový kohout (KK1), zúžení průřezu potrubí (RH1), rozšíření průřezu potrubí (RH2), velký oblouk (KR, K1, K2), kompenzační smyčka (KS), ventil přímý (VP) a koleno 45° (K3). Dále je obvod tvořen těmito prvky: nádrž na vodu (N), čerpadlo (HG), U – trubice (UT1 – UT5 a UTC) pro měření rozdílu tlakové energie a spojovací prvky potrubí.

Princip funkce obvodu: čerpadlo nasává vodu z instalované nádrže a vhání ji do potrubního systému. V tomto systému jsou umístěné prvky na nichž je zjišťována tlaková diference z odběru tlaku před a za každým prvkem pomocí U – trubic připojených na tato odběrná místa. Z potrubního systému je voda odváděna zpět do nádrže.

Tlakovou diferenci je možno zjišťovat při různých průtocích. Průtok vody je možno regulovat jak pomocí regulace čerpadla (HG) (3 stupně průtoku), tak pomocí kulového kohoutu KK2 (plynulá regulace průtoku). Změny tlakové diference jsou zjišťovány na příslušné U trubici (UT1-UT5). Měření rychlosti proudění v obvodu je realizováno pomocí clony a U – trubice (UTC) zaznamenávající vzniklou tlakovou diferenci – ta je úměrná rychlosti proudění.

Specifikace použitých prvků

Nádrž (N)

Objem nádrže: 42 dm^3

Čerpadlo (HG)

WILO RS 25/4 230 V PN 10

Jmenovité otáčky: 1200/1650/2000 ot.min⁻¹

Clona (C)

Vnitřní průměr clony: 14 mm

Vnitřní průměr potrubí: 18 mm

Potrubí (P1)

Vnější průměr: 25 mm

Vnitřní průměr: 18 mm

Potrubí (P2)

Vnější průměr: 20 mm

Vnitřní průměr: 14,4 mm

Kulový kohout (KK1, KK2)

Vnitřní průměr: 18 mm

Redukce hrdlová (pro zúžení/rozšíření potrubí)**(RH1, RH2)**

Vnější průměr: 18 mm

Vnitřní průměr: 14,4 mm

Křížení (KR)

Vnější průměr: 25 mm

Vnitřní průměr: 18 mm

Koleno 45° (K1, K2, K3)

Vnitřní průměr: 18 mm

Koleno 90° (K4)

Vnitřní průměr: 18 mm

Kompenzační smyčka (KS)

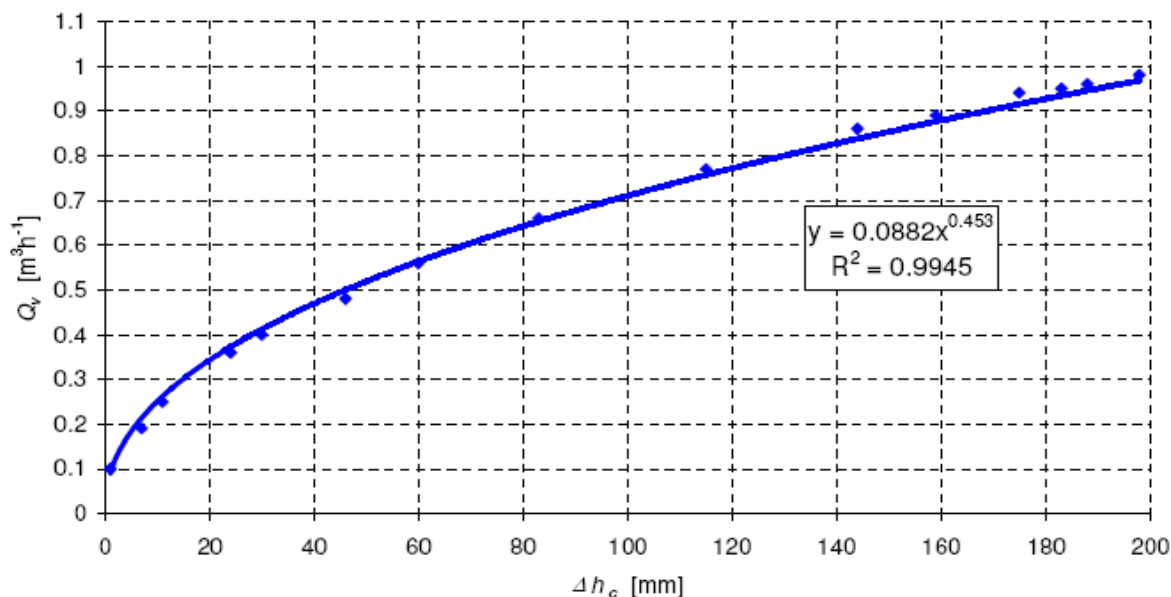
Vnější průměr: 18 mm

Ventil přímý (VP)

Vnitřní průměr: 18 mm

U – trubice (UT1, UT2, UT3, UT4, UT5, UTC)**Cejchovní křivka clony**

Při použití clony jako měřidla rychlosti je nutné znát tzv. cejchovní křivku clony (obr.3.6), pomocí které lze ze ztrátové výšky na cloně určit průtok, který je této výšce úměrný.



obr. 3.6 Cejchovní křivka clony z obvodu na měření místních ztrát

Vyhodnocení měření

Pro výpočet místní ztráty ξ je nutné znát rychlost proudění v potrubí. Tu lze vypočítat z průtoku potrubím Q_v . Průtok je úměrný ztrátové výšce Δh_c na cloně. Vyhodnocení naměřených hodnot se doplní do tabulky (v příloze tab. 8.3) a určí se dle vzorce:

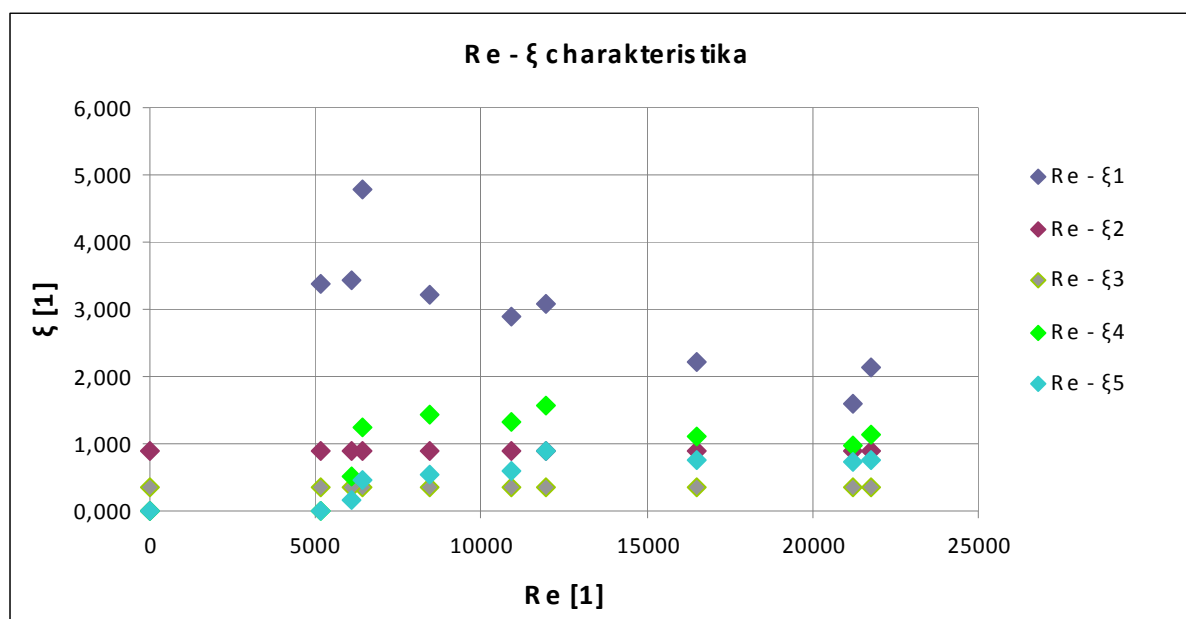
$$h_z = \Delta h_p = \zeta \frac{v^2}{2g} \Rightarrow \zeta = \frac{2\Delta h_p g}{v^2} \quad (3.1)$$

ztrátový součinitel. Ztrátový součinitel ξ_1 je pro kulový kohout (KK1), ξ_2 pro zužení průřezu potrubí (RH1), ξ_3 pro rozšíření průřezu potrubí (RH2), ξ_4 pro velký oblouk (KR, K1, K2) a ξ_5 pro koleno 90° (K4) (výsledky v příloze tab. 8.3 nebo je možné se podívat přímo na výpočty v excelu, které jsou na CD).

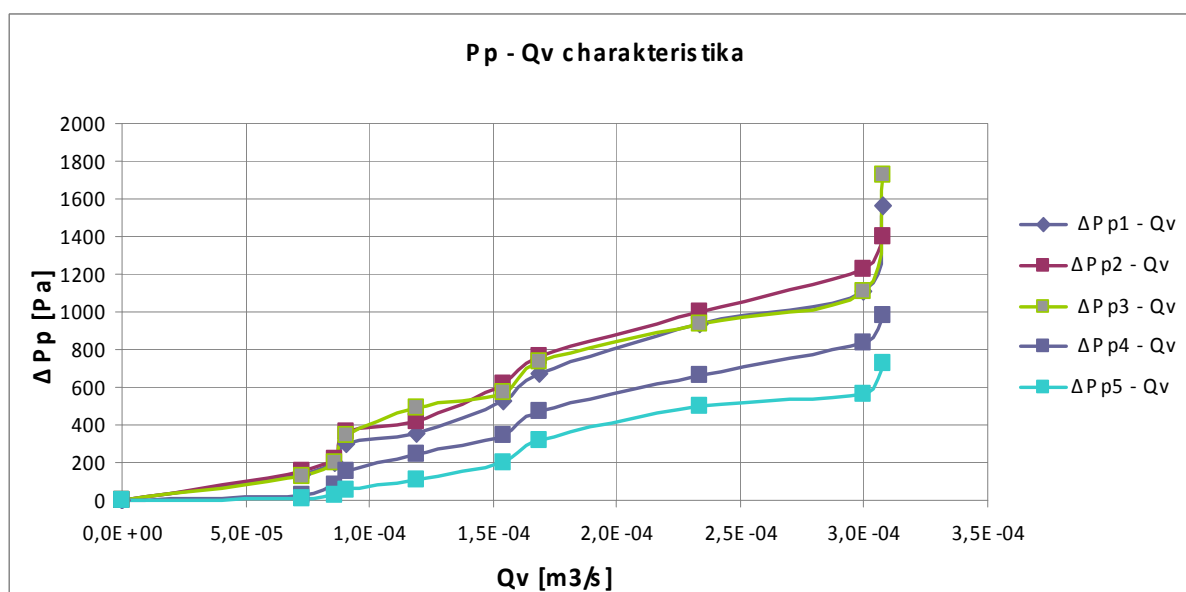
Pro zužení jsem použil vzorec: $\xi_2 = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right) \cdot \frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} - 1 \right) \left(\frac{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} \right)$ (3.2)

Pro rozšíření platí vzorec: $\xi_3 = 1 - \frac{S_1}{S_2} = 1 - \frac{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}}$ (3.3)

Porovnání jednotlivých ztrátových součinitelů je v grafech (obr. 3.7 a obr. 3.8).



obr. 3.7 Graf závislosti Re - ξ pro místní ztráty



obr. 3.8 Graf závislosti Pp - Qv pro místní ztráty

4. PROGRAM SiteFlow2005

SiteFlow2005 je systém pro řešení zpracování vodovodů a kanalizací. Je to software velmi ohebný a přizpůsobivý přání uživatele, ale zároveň velmi jednoduchý na obsluhu. SiteFlow spojuje přednosti matematického modelování a grafického systému pracujícího podle CAD principů. Pokud tento software přispěje k tomu, že budou stavby vodovodů a kanalizací provedeny ještě lépe a efektivněji.

Členění SiteFlow a verze programu

Verze SiteFlow2005 – vodovod a kanalizace, jsou určeny pro navrhování, posuzování a projektování tlakových i netlakových systémů. Používá se pro vodovodní sítě, ale stejně dobře s ní jde navrhnout i kanalizace a to jak tlaková, tak gravitační.

V **SiteFlow2005 – vodovod** spočítáte síť s tlakovým prouděním kde je dopravovaným médiem voda nebo látky které se chovají obdobně.

- vodovodní systémy
- tlaková kanalizace
- podtlakové odvodnění střech

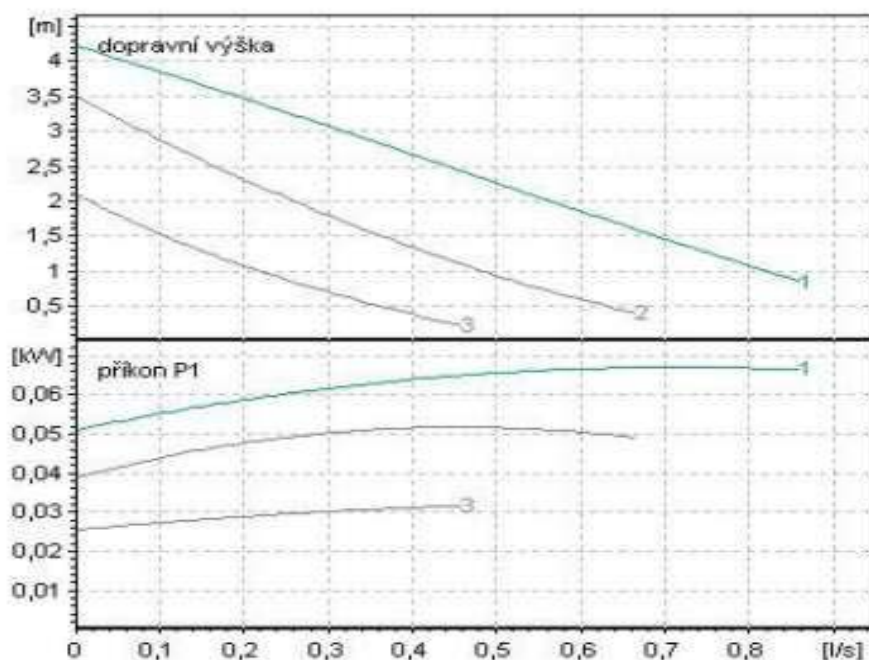
SiteFlow – vodovod je určený pro výpočet tlakových systémů – vodovodů a tlakových kanalizací. Jeho použití je pro posuzování, projektování a vykreslování. Se SiteFlow můžete posoudit tlakové poměry, kapacitu potrubí nebo modelovat různé provozní stavy. Použijete ho pro koncepční fázi generelního přepočtu nebo pro výpočty pro projektové práce. Hravě si tak spočtete okružovou síť nebo posoudíte čerpadlo. Matematickým modelem prověříte chování sítě v různých reálných zatěžovacích stavech. [6]

5. VÝPOČET FYZIKÁLNÍM EXPERIMENTEM

5.1 Příklad proudění v jednoduchém obvodu

V programu SiteFlow jsem nakreslil schéma s jedním potrubím, dle měřicího odvodu ve skutečnosti. Měří se vodorovné potrubí o konstantní délce L a průměru potrubí d pro vnitřní průměr 14,4mm, 18mm a 23,2mm.

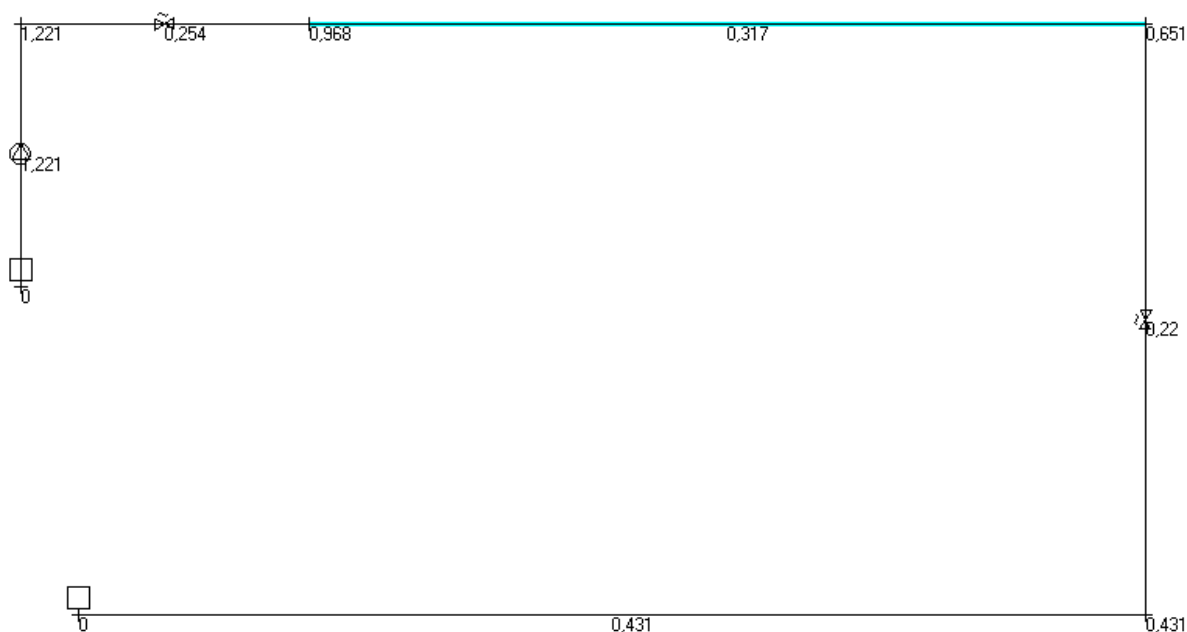
Na obrázku 5.2 je schéma odvodu s jedním potrubím. Kontroluji vyznačený úsek o délce $L = 1,104\text{m}$ a vnitřním průměru 14,4mm. Jako zdroj jsem do obvodu vložil čerpadlo, s předem nadefinovanými parametry, tj. dopravní výškou a průtokem čerpadla (obr. 5.1). Na čerpadle jsou nastavené maximální otáčky 2000ot/min., bereme v úvahu křivku číslo 1 z obr. 5.1.



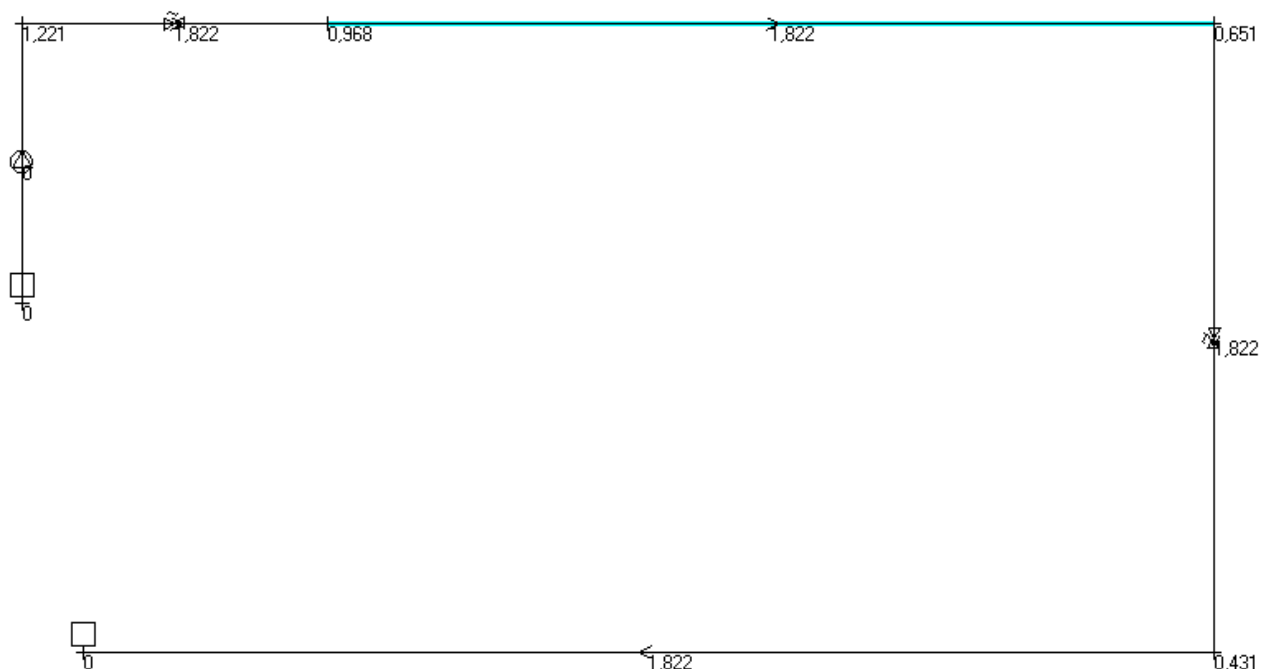
Obr. 5.1 Charakteristika čerpadla WILO RS 25/4 230 V PN 10

Dále je vložena na vstupu nekonečná nádrž, která je zásobou vody s hladinou 0m.n.m. Na konci obvodu jsem vložil také nádrž o hladině 0m.n.m. Čísla, které se pod jednotlivými potrubími zobrazují jsou tlakové úbytky v potrubí. Zobrazovaná hodnota ukazuje Δh , čili tlakovou výšku, která se pak ještě musí přepočítat na $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$. Po nadefinování všech údajů, změnou vstupních parametrů čerpadla (účinnosti) nebo vkládáním místních odporů do obvodu v podobě různých ventilů, které SiteFlow nabízí (pojistných, redukčních aj.) měním

hodnoty. Na ventilech se nastaví hodnota součinitele místního odporu ξ . Měním účinnost čerpadla tak dlouho, dokud se hodnota měřeného tlakového spádu Δp kontrolovaného potrubí nebude shodovat (alespoň přibližně) s hodnotou vypočtenou dle vzorce pro $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$. Pak jsem si nechal zobrazit rychlost na daném úseku (obr. 5.3), která se shodovala s vypočtenou rychlostí, z čehož vyplývá, že SiteFlow se v tomto případě shodoval s měřením.



obr. 5.2 Schéma obvodu s jedním potrubím, zobrazení tlakové ztráty

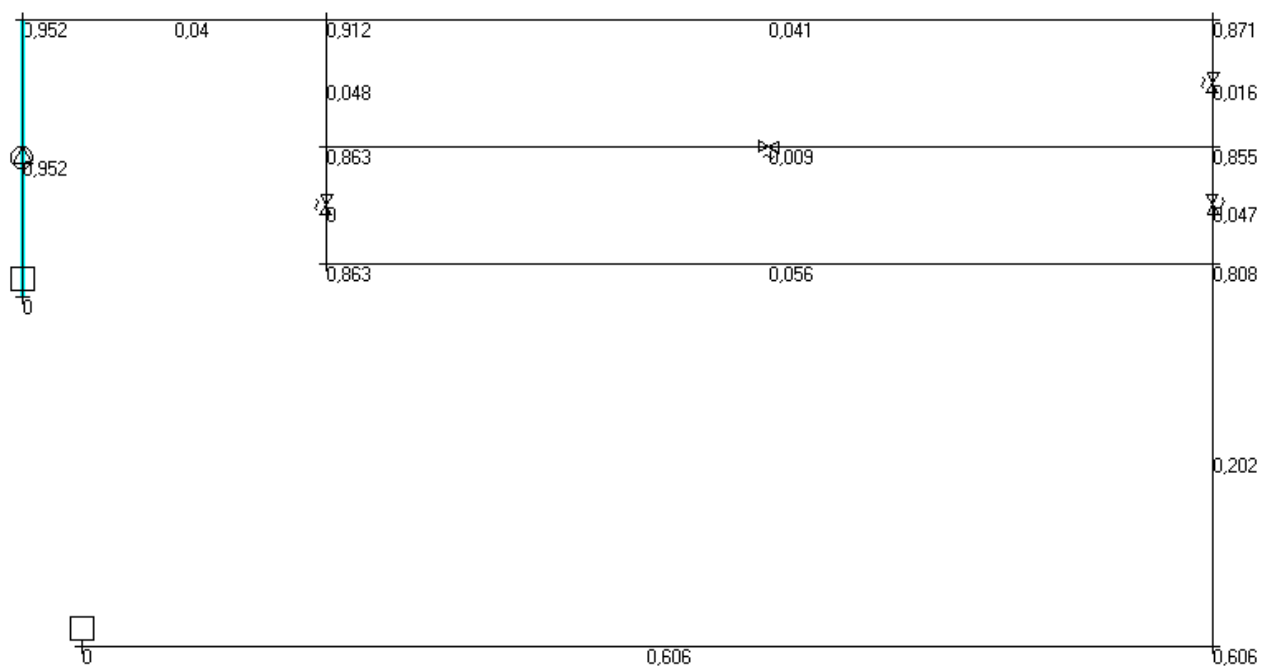


obr. 5.3 Schéma obvodu s jedním potrubím ,zobrazení rychlosti

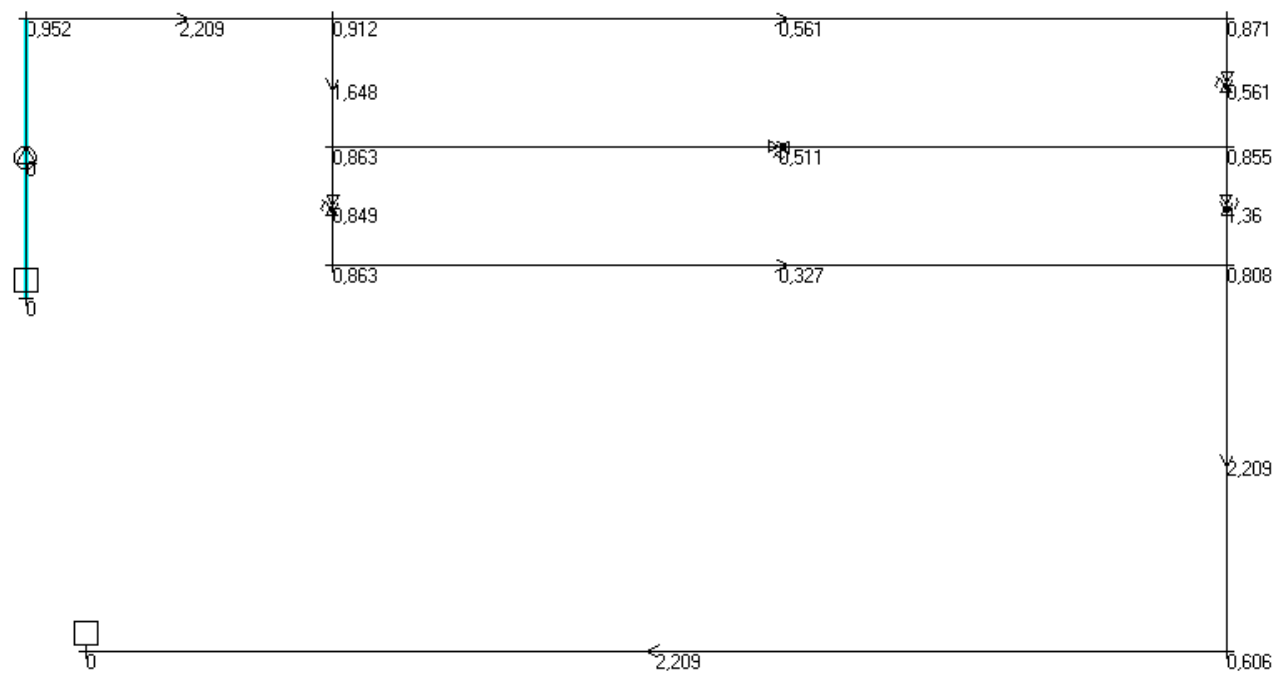
Závěrem můžu říci, že obvod lze modelovat za předpokladu podrobných znalostí všech elementů, tj. jejich ztrátových součinitelů. Jinak je nutno tyto součinitele odhadovat tak, aby měřené veličiny souhlasily s vypočtenými.

5.2 Příklad proudění ve složeném obvodu

Postupoval jsem obdobně jako u proudění v jednoduchém odvodu. Nadefinoval jsem si předepsané parametry čerpadla, průměry potrubí, i potřebné místní odpory, kterými jsem dosáhl požadovaného tlakového úbytku na jednotlivých potrubích (obr. 5.4). Poté jsem si nechal zobrazit rychlosti na jednotlivých potrubích (obr. 5.5), které se téměř naprosto shodovaly s vypočtenými hodnotami a tudíž potvrdily správnost výpočtu.



obr. 5.4 Schéma složeného obvodu, zobrazení tlakové ztráty



obr. 5.5 Schéma složeného obvodu, zobrazení rychlosti

6. ZÁVĚR

Výpočet místních ztrát přes program SiteFlow je velmi složitý a nelze ho nejspíš ani realizovat. Místní odpory lze do obvodu vkládat jen za pomoci ventilů (tj. jejich ztrátových součinitelů), ale tato metoda je nepřesná. Řekl bych, že SiteFlow má v této oblasti příliš velké nedostatky a počítat místní ztráty v tomto programu je nevýhodné. U výpočtu třecích ztrát je do lepší, ale také to žádná sláva není.

I když program má širokou škálu předem nadefinovaných čerpadel, tak po vytvoření vlastního čerpadla a zadání jeho parametrů, se bohužel nedá toto čerpadlo uložit do paměti programu a tudíž po znovu – otevření programu se musí parametry znovu pracně zadávat. Naštěstí tomu tak není u databáze potrubních materiálů, kde je mimochodem škála potrubních materiálů velmi široká.

Ovšem tento program má i řadu předností. Například je vcelku jednoduchý při kreslení potrubí a po přečtení manuálu a seznámení se s programem, se s ním velmi lehce a rychle pracuje. Hlavní menu je velmi přehledné a grafické modelování je pro uživatele atraktivní. Je v podstatě udělaný na bázi programu AutoCAD, což je velmi známý a rozšířený rýsovací program, se kterým se už kde kdo setkal, takže se pracovat v tomto programu naučí každý.

Když to shrnu, tak má práce bylo ověřit a zhodnotit třecí a místní ztráty v potrubí tímto programem. Programem SiteFlow se to dá počítat, ovšem zabývá se tímto problémem jen okrajově. Na hlubší a složitější výpočty sítí bych ho nedoporučoval. Jeho předností je především výpočet tlakových i netlakových kanalizací a vodovodů. Tam má své přednosti a především plně využije všech svých schopností a výhod, které nabízí.

Poděkování

Děkuji touto formou vedoucí mé bakalářské práce doc. RNDr. Miladě Kozubkové, Csc.
za odborné vedení, rady a připomínky, které mi poskytla během psaní mé bakalářské práce.

7. POUŽITÉ ZDROJE A LITERATURA

[1] Bojko, M., Kozubková, M., Rautová, J.: *Základy hydromechaniky a zásobování hasivý*, VŠB – TU Ostrava, 2007, 182 s., ISBN 80-86634-53-1 .

[2] Janalík, J., Šťáva, P.: *Mechanika tekutin*, VŠB – TU Ostrava, 2002, skript FS, 124 s., ISBN 80-248-0038-1.

[3] Hradil, F.: *Potrubní systémy*, VŠB – TU Ostrava, skript FS, 2002, 159 s., ISBN 80-7078-253-6.

[4] Schmidtmayer, J.: *Maticový počet a jeho použití v technice*, SNTL, Praha 1967, 384s., Typové číslo L11i-B3-IV-51/1483/XI – Vydání druhé.

[5] Braun, J., Čížek, V., Kvasil, J., Novák, M.: *Analýza lineárních obvodů a soustav*, SNTL, Praha 1973, 420s., Typové číslo L26i-B3-IY-41/52031/VII – Vydání první.

[6] Manuál programu SiteFlow2005, 128 s.

[7] Techsoft Engineering, (program na výpočet potrubních sítí)

[8] Kozubková, M., a kolektiv: *Mechanika tekutin – návody pro laboratorní cvičení*, Ostrava, 2007.

Internetové zdroje:

[9] Dostupné na: <http://www.tzbinfo.sk/t.py?t=2&i=2563&h=257&pl=39>

(Tlakové ztráty potrubní sítě)

[10] Dostupné na: <http://voda.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=21&h=38&obor=6>

(Hodnoty součinitelů místních ztrát)

[11] Dostupné na: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=87&h=38>

(Výpočet tlakové ztráty třením v potrubí)

[12] Dostupné na: http://www.nri.cz/cz/energo_sw_hydro.html

(Hydraulické a termodynamické výpočty)

[13] Dostupné na:
http://www.fluids.fs.cvut.cz/akce/konference/setkani_2007/sbornik/doc/Rautova.pdf

(Měření třecích a místních ztrát na vodní trati)

[14] Dostupné na:

http://www.fsid.cvut.cz/~schwarze/schwarzer_soubory/Soubory/Vzduchovody/vzduchovody2.pdf

(Metodika návrhu potrubních sítí)

8. PŘÍLOHY

8.1 Tabulky

Měření	Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty					
	Δh_c [cm]	Δh_p [cm]	Δp_p [Pa]	Q_v [$m^3 h^{-1}$]	v [m/s]	Re [-]	λ_{teoret}	λ_{vypoct}
1.	50,8	21,2	2079,7	1,425	1,556	28015	0,028	0,024
2.	50,5	20,2	1981,6	1,421	1,552	27942	0,027	0,024
3.	47,1	19	1863,9	1,378	1,505	27097	0,027	0,025
4.	41,3	17,2	1687,3	1,301	1,421	25573	0,027	0,025
5.	34,2	14,6	1432,3	1,197	1,307	23534	0,027	0,026
6.	25,5	11	1079,1	1,052	1,149	20679	0,027	0,026
7.	20,3	9,8	961,4	0,951	1,039	18703	0,029	0,027
8.	13,8	7	686,7	0,803	0,877	15779	0,029	0,028
9.	7,2	4	392,4	0,603	0,658	11847	0,030	0,030
10.	1,7	1,3	127,5	0,319	0,348	6273	0,034	0,036

tab. 8.1 - Naměřená a vypočtená tabulka pro 2. trubici (ϕ 18mm)

Měření	Naměřené hodnoty		Vypočítané hodnoty			
	Δh_c [cm]	Δh_p [cm]	Δp_p [Pa]	Q_v [$m^3 h^{-1}$]	v [m/s]	Re [-]
1.	49,3	45,1	4424,3	1,406	0,925	21450
2.	46,7	44,0	4316,4	1,373	0,903	20944
3.	44,1	40,1	3933,8	1,339	0,880	20423
4.	39,3	37,2	3649,3	1,273	0,837	19412
5.	28,8	28,2	2766,4	1,110	0,730	16928
6.	17,9	18,0	1765,8	0,900	0,592	13728
7.	14,9	15,0	1471,5	0,830	0,546	12663
8.	10,2	10,8	1059,5	0,703	0,462	10716
9.	7,3	7,7	755,4	0,606	0,399	9248
10.	4,8	5,5	539,6	0,504	0,331	7688

$\lambda_{\text{vypočtené}}$	$\lambda_{\text{teoret-ALTSUL}}$	$\lambda_{\text{teoret-NIKURADSE}}$	$\lambda_{\text{teoret-COLEBROOK}}$	$\lambda_{\text{teoret-CHURCHILL}}$	$\lambda_{\text{vypočt-CHURCHILL}}$
0,218	0,074	0,020	0,211	0,212	0,212
0,223	0,061	0,020	0,211	0,212	0,212
0,213	0,061	0,021	0,211	0,212	0,212
0,219	0,061	0,021	0,211	0,212	0,212
0,218	0,061	0,021	0,211	0,213	0,213
0,212	0,061	0,023	0,212	0,213	0,213
0,208	0,061	0,023	0,212	0,213	0,213
0,209	0,061	0,024	0,212	0,214	0,214
0,200	0,061	0,025	0,212	0,214	0,214
0,206	0,061	0,026	0,212	0,214	0,214

2/2

tab. 8.2 - Naměřená a vypočtená tabulka pro 3. trubici (drsnou, $\phi 23,2\text{mm}$)

Měření	Naměřené hodnoty					
	Δh_c [cm]	Δh_{p1} [cm]	Δh_{p2} [cm]	Δh_{p3} [cm]	Δh_{p4} [cm]	Δh_{p5} [cm]
1.	26,6	15,9	14,3	17,6	10,0	7,4
2.	25,2	11,3	12,5	11,3	8,5	5,7
3.	14,5	9,5	10,2	9,5	6,8	5,1
4.	7,1	6,9	7,8	7,5	4,8	3,2
5.	5,8	5,4	6,3	5,8	3,5	2,0
6.	3,3	3,6	4,3	5,0	2,5	1,1
7.	1,8	3,1	3,7	3,5	1,6	0,6
8.	1,6	2,0	2,2	2,0	0,8	0,3
9.	1,1	1,4	1,6	1,3	0,3	0,1
10.	0	0	0	0	0	0

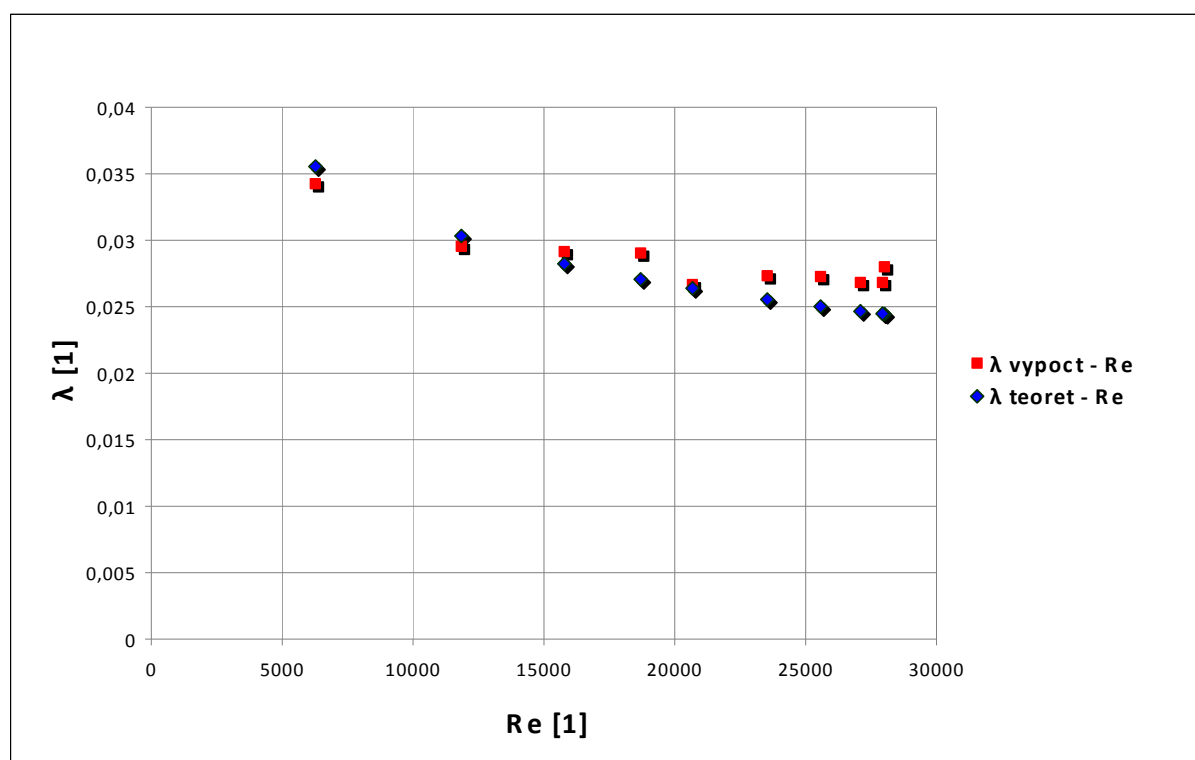
1/3

Vypočtené hodnoty						
Δp_{p1} [Pa]	Δp_{p2} [Pa]	Δp_{p3} [Pa]	Δp_{p4} [Pa]	Δp_{p5} [Pa]	Q_v [m^3s^{-1}]	v_1 [m/s]
1560	1403	1727	981	726	3,1E-04	1,208
1109	1226	1109	834	559	3,0E-04	1,179
932	1001	932	667	500	2,3E-04	0,918
677	765	736	471	314	1,7E-04	0,664
530	618	569	343	196	1,5E-04	0,606
353	422	491	245	108	1,2E-04	0,470
304	363	343	157	59	9,1E-05	0,357
196	216	196	78	29	8,6E-05	0,338
137	157	128	29	10	7,3E-05	0,285
0	0	0	0	0	0	0

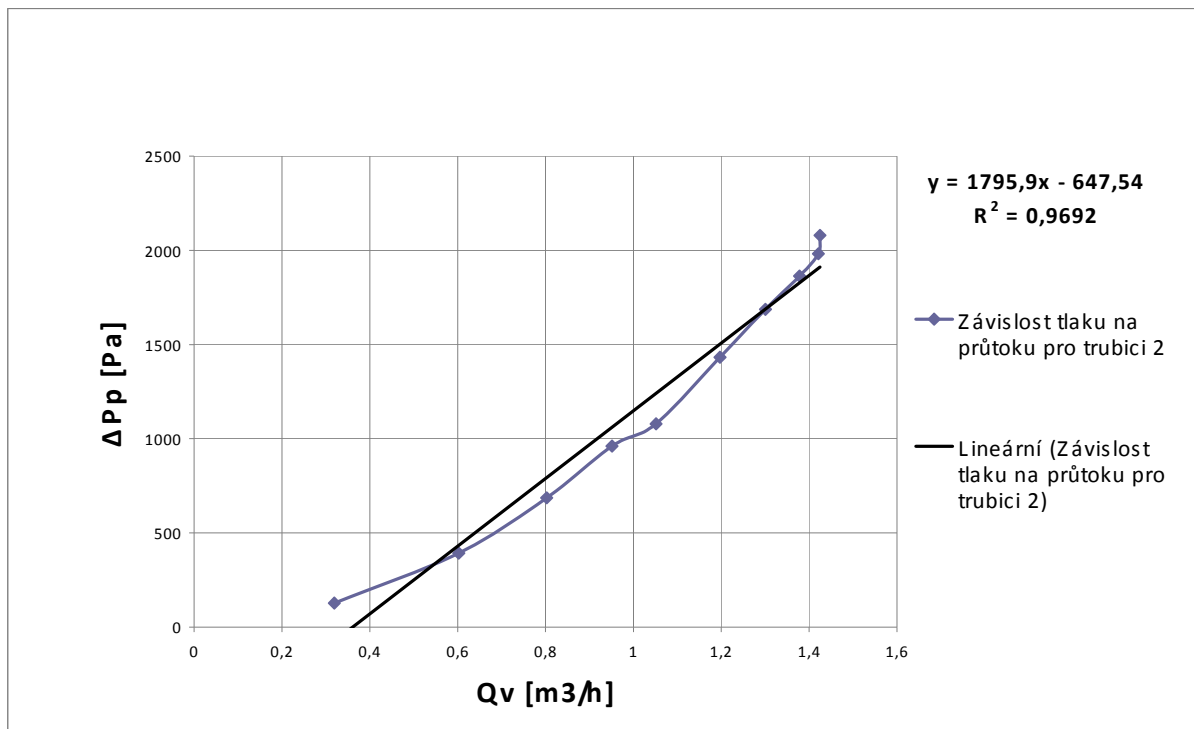
v_2 [m/s]	Re [-]	ξ_1 [-]	ξ_2 [-]	ξ_3 [-]	ξ_4 [-]	ξ_5 [-]
1,888	21752	2,136	0,879	0,360	1,142	0,766
1,842	21226	1,594	0,879	0,360	0,959	0,720
1,434	16524	2,212	0,879	0,360	1,117	0,745
1,038	11958	3,068	0,879	0,360	1,556	0,889
0,947	10911	2,884	0,879	0,360	1,335	0,587
0,734	8451	3,204	0,879	0,360	1,424	0,534
0,557	6422	4,778	0,879	0,360	1,233	0,462
0,528	6088	3,430	0,879	0,360	0,514	0,171
0,446	5138	3,371	0,879	0,360	0,000	0,000
0	0	0,000	0,879	0,360	0,000	0,000

tab. 8.3 – Naměřené a vypočtené hodnoty pro místní ztráty

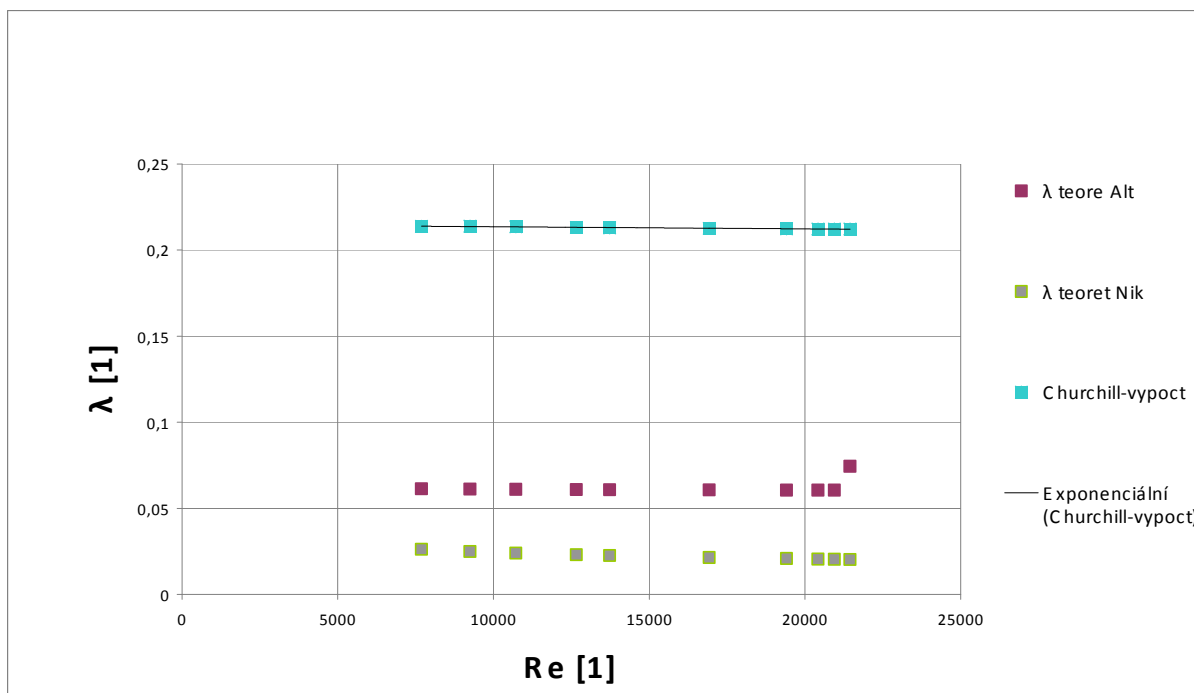
8.2 Grafy



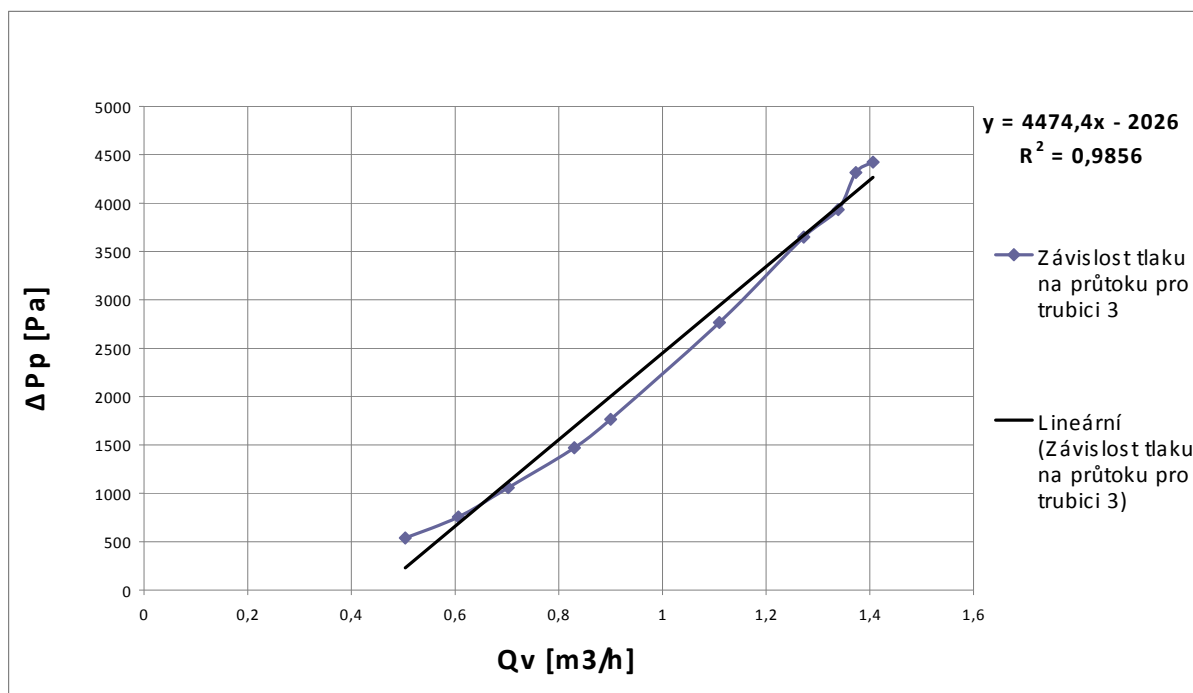
obr. 8.1 Odchylka mezi výslednými třecími součiniteli pro 2. trubici



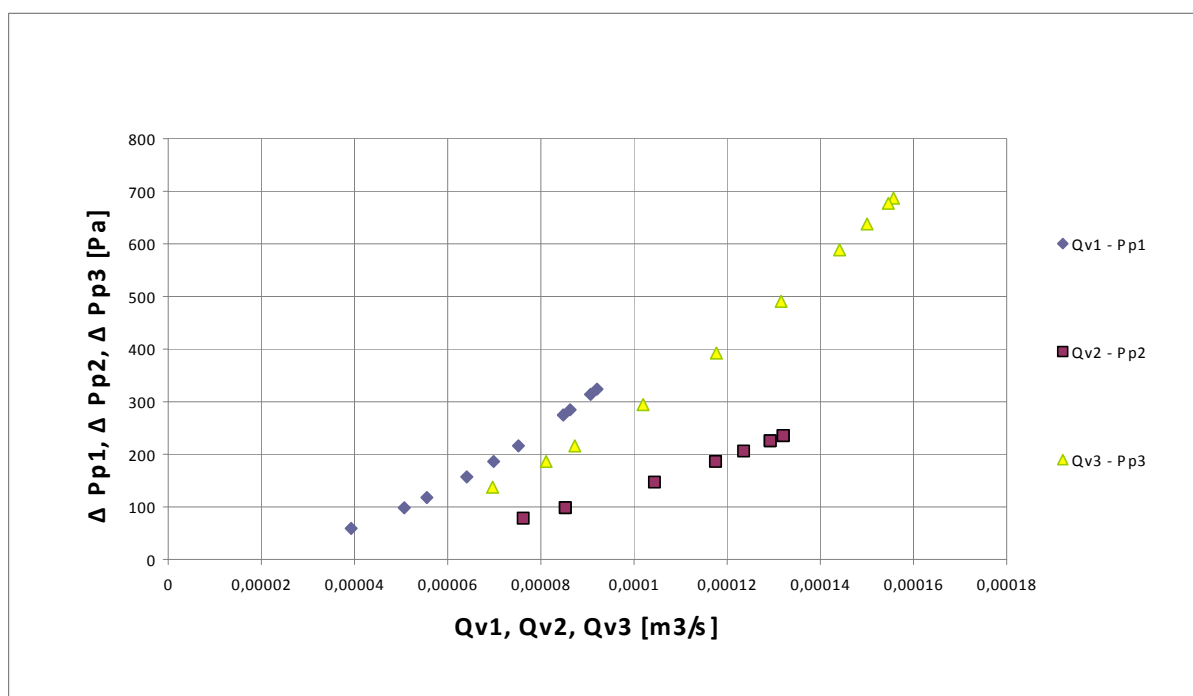
obr. 8.2 Graf závislosti Δp_p - Q_v pro 2. trubici



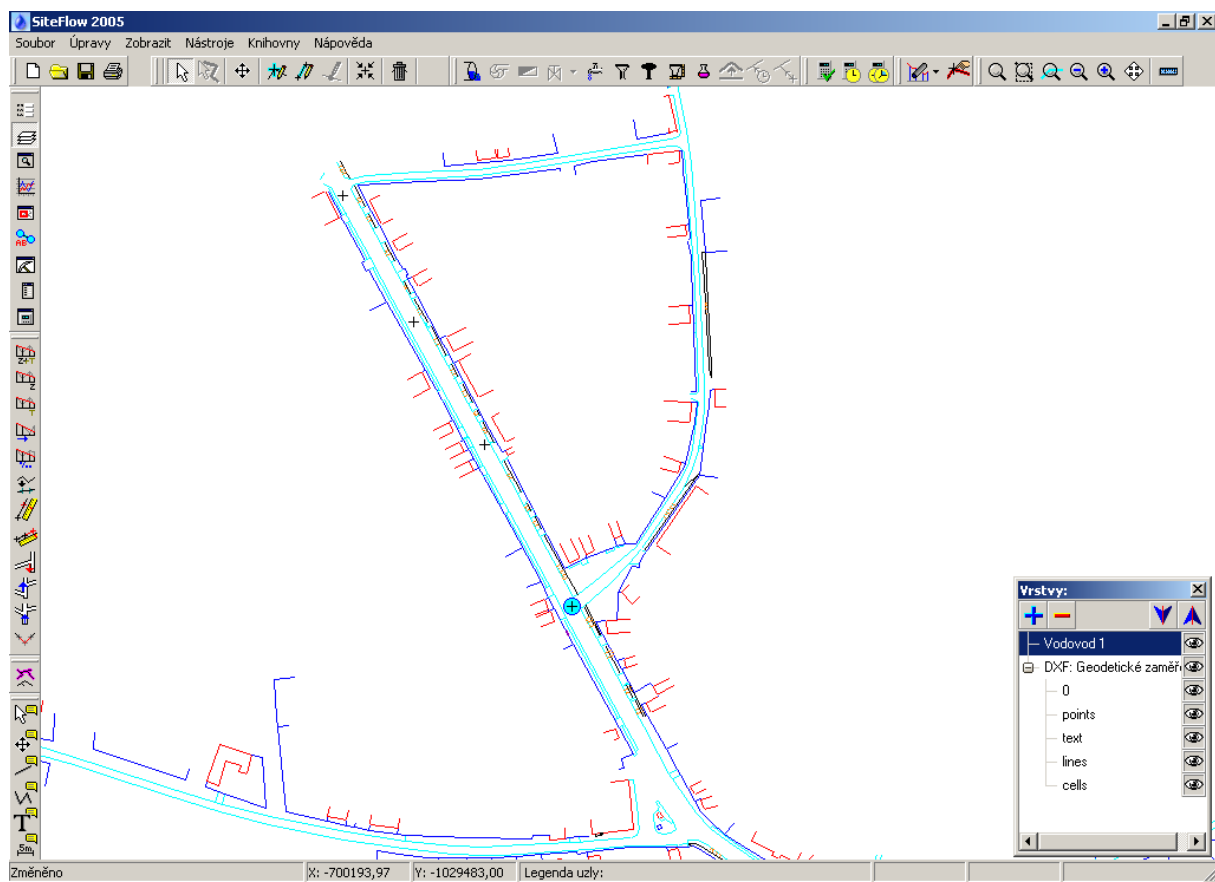
obr. 8.3 Porovnání třecího součinitele, vypočteného jednotlivými vzorci pro 3. trubici (drsnou, ϕ 23,2mm)



obr. 8.4 Graf závislosti $\Delta p_p - Q_v$ pro 3. trubici (drsnou, ϕ 23,2mm)



obr. 8.5 Graf závislosti $\Delta p_p - Q_v$ všech tři trubic dohromady



obr. 8.6 Ukázka vizuální podoby programu SiteFlow